



基于 MATLAB 的光学实验教学辅助方案

郭俊宏, 邹 辉*

(南京邮电大学 电子与光学工程学院&柔性电子(未来技术)学院, 南京 210023)

摘要: 衍射作为一种经典的光学现象, 在实际工程中大量存在, 是大学光学工程专业的基础教学重点和难点之一。该文基于 MATLAB 软件针对圆环状孔径的衍射仿真, 观测其衍射图形和光场分布, 通过改变环型缝隙的大小, 研究其衍射结果的变化规律, 进而拓展仿真研究了矩形、三角形等不同孔径的衍射特性。结果表明, MATLAB 软件在光学教学中, 具有操作简单、不受实验条件限制、现象展示清晰等优势, 为计算机辅助光学授课提供了便捷手段。

关键词: MATLAB; 光学; 衍射; 仿真; 教学

中图分类号: O436

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20240229](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20240229)

Optical Experiment Teaching Assistance Scheme Based on MATLAB

GUO Junhong, ZOU Hui*

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Diffraction, as a classic optical phenomenon, is widely present in practical engineering. It is one of the fundamental teaching focuses and difficulties in university optical engineering programs. The MATLAB software platform is utilized to simulate the diffraction of an annular aperture, observing its diffraction pattern and light field distribution. The variation patterns of the diffraction results are investigated by changing the size of the annular gap. Furthermore, the simulation is extended to study the diffraction characteristics of different apertures, such as rectangular and triangular ones. The results show that MATLAB software has advantages in optical teaching, such as simple operation, unrestricted experimental conditions, and clear visualization of phenomenon, providing a convenient means for computer-aided optical teaching.

Key words: MATLAB; optics; diffraction; simulation; teaching

光的衍射是指当光遇到障碍物时会偏离原来直线传播的物理现象。在现代光学和物理学中, 光的衍射得到越来越多的重视和应用, 如用于光谱分析的衍射光栅光谱仪、精细结构分析的 X 光衍射、衍射成像、全息成像等。然而在传统的光学教学过程中, 教学中的实验演示内容主要为单缝衍射、双缝衍射和圆孔衍射等几类理想化的衍射模型, 对生活和仪器设备应用中常见的复杂结构衍射极少涉及, 这使学生对于此部分知识的学习与实践相脱离, 达不到学以致用教学目标。造成这一现象的主要原因是复杂结构引发的衍射不易观测, 在有限的课时内无法在课堂上有效呈

现。基于此, 本文通过利用 MATLAB 软件的微分方程求解和可视化功能, 再现了复杂结构的衍射现象^[1-4]。选取环型缝隙这一复杂结构为教学案例, 通过快速傅里叶变换仿真模拟光的传播, 展现了不同大小缝隙下的衍射图像, 并且绘制了相应的光强分布。学生可以直观观测实验现象, 建立衍射现象的感性认识, 并进一步获取相关的衍射参数, 建立正确、全面的衍射概念。

1 复杂结构的光学衍射原理分析

光波的衍射可用惠更斯-菲涅耳原理和波的叠加原理进行描述, 其理论认为, 可以把波前的每

收稿日期: 2024-04-26

基金项目: 江苏省高等教育教学改革研究课题重点项目 (2021JSJG135, 2023JSJG433)。

作者简介: 郭俊宏, 博士, 讲师, 主要从事光电子器件及光纤传感器的研究。E-mail: jhguo@njupt.edu.cn

* 通信作者: 邹辉, 博士, 副教授, 主要从事光电子器件及光纤传感器的研究。E-mail: huizou@njupt.edu.cn

一点考虑为次波(球面波)的点波源,这些次波就是后续时刻的波面。根据这一理论,任意后续位置的波位移等于这些次波求和,且并非简单的代数求和,而必须考虑这些波各自的相对相位以及振幅。因此,它们叠加之后的振幅范围介于0(相互完全抵消)和所有次波振幅的代数总和之间。对于夫琅禾费衍射,其光场复振幅分布为:

$$E_d(x, y) = \frac{e^{jkd}}{j\lambda d} e^{j\frac{k}{2d}(x^2+y^2)} \iint E_0(x_0, y_0) \times \exp\left(-jk \frac{xx_0 + yy_0}{d}\right) dx_0 dy_0 = \frac{e^{j\lambda d}}{j\lambda d} e^{j\frac{k}{2d}(x^2+y^2)} \text{FT}\{E_0(x_0, y_0)\} \quad (1)$$

式中: x_0, y_0 为入射光场横纵坐标, $E_0(x_0, y_0)$ 为入射光场分布, k 为衍射级次, d 为衍射孔径, FT 为傅里叶变换符号。

2 圆环衍射的 MATLAB 仿真

如图 1 所示,在一块不透明的玻璃隔板上(厚度可忽略的隔板),刻画出一个外半径为 r_1 和内半径为 r_2 的环型透明区(r_1 和 $r_2 \ll d$),采用平面光波入射。圆孔的透过率函数为:

$$t(r) = \text{circ}\left(\frac{r}{d/2}\right) \quad (2)$$

式中: d 是圆孔的直径,单位 μm ; r 是孔径平面上的径向坐标,单位 μm 。圆环光孔可以看作两个圆孔之差,所以圆环的透过率函数为:

$$t(r) = \text{circ}\left(\frac{r}{r_1}\right) - \text{circ}\left(\frac{r}{r_2}\right) \quad (3)$$

式中: r_1 和 r_2 分别是圆环的外半径和内半径,单位 μm 。

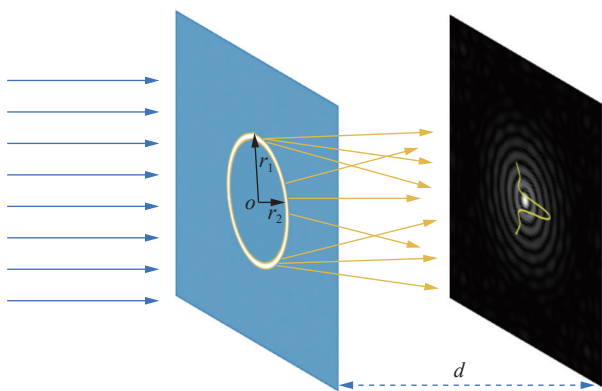


图 1 环型缝隙的衍射模型

这属于一个二维结构的衍射问题,可采用

MATLAB 内置的快速傅里叶变换——fft2()内置函数,方便地进行衍射情景的仿真^[5-9]。fft2()内置函数采用 Cooley-Tukey 算法执行离散的傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)。

fft2()内置函数是将二维傅里叶变换分解成两个一维傅里叶变换来计算。首先对输入的每一行执行一维 FFT,步长为 q ,再对得到的结果的每一列执行一维 FFT,步长为 p 。

由于 MATLAB 内嵌的 fft2()函数变换后的中心索引位于图像的周边角,也就是最大强度在周边角,而不是在中心位置,与实际情况不符。因此,需要调用 MATLAB 中内嵌的 fftshift()函数进行调整,从而使得快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)频谱的可视化效果与实际情况相一致。

MATLAB 仿真程序 annular diffraction.m 源代码如图 2 所示。

```
1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 %环型结构的光学衍射仿真
3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4 clear; %清除所有变量
5 clc; %清除命令窗口内容
6 close all; %关闭所有作图窗口
7 x=(-2:0.05:2); %x轴计算范围,网格宽度0.005
8 y=(-2:0.05:2); %y轴计算范围,网格宽度0.005
9 I1=y.*x; %隔板网格划分
10 i_index=0; %初始化变量i_index为0。
11 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
12 %环型结构建模
13 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
14 for i=-2:0.05:2
15     j_index=0;
16     i_index=i_index+1;
17     for j=-2:0.05:2
18         j_index=j_index+1;
19         r=sqrt(i^2+j^2);
20         if r <= 0.5 && r >= 0.3 %限定环型区域
21             I1(i_index,j_index)=1; %环型内E值设为1,表示透光且光强为1
22         else
23             I1(i_index,j_index)=0; %环型外E值设为0,表示不透光
24         end
25     end
26 end
27 I2=abs(fft2(I1)); %对衍射孔进行二维傅里叶变换,得到衍射图像
28 I2=fftshift(I2); %将衍射图像进行移相,使最大值位于中心
29 I2=I2/max(max(I2)); %衍射光强归一化
```

图 2 环型孔径的衍射仿真代码

运行 annular_diffraction.m 即可得到平面波通过环型孔径后的衍射光强。接下来可以对衍射图形进行仿真再现。利用 MATLAB 丰富且强大的绘图功能,可以很容易实现孔径模型、衍射图形、中心线光强分布、三维光强分布等多种数据的图形化展示,代码如图 3 所示。

运行上述两部分程序代码,即可实现环型结构波动光学衍射的仿真实验。教学演示过程中可以改变环型孔径的大小(透光环宽度),甚至可以改变环型结构(如三角形、五边形等),从而获得对应的衍射结果。通过对比分析,有效解决了复杂结构波动光学衍射实验的设计难题。

```

31 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
32 %环形孔径作图
33 subplot(2,2,1);
34 imshow(I1)          %显示灰度图像
35 xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('I1');
36 title('annular hole');
37 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
38 %衍射图像作图
39 subplot(2,2,2);
40 imshow(I2)          %显示灰度图像
41 xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('I2');
42 title('diffraction image');
43 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
44 %中心线光强分布
45 subplot(2,2,3);
46 plot(I2(:,40,:))    %中心线上的光强
47 xlabel('x'); ylabel('I2');
48 title('intensity');
49 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
50 %三维光强分布图
51 subplot(2,2,4);
52 surf(x,y,I2);       %显示衍射图像光强的三维曲面
53 shading flat
54 shading interp
55 cmap = colorbar;
56 xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('I2');
57 title('intensity');

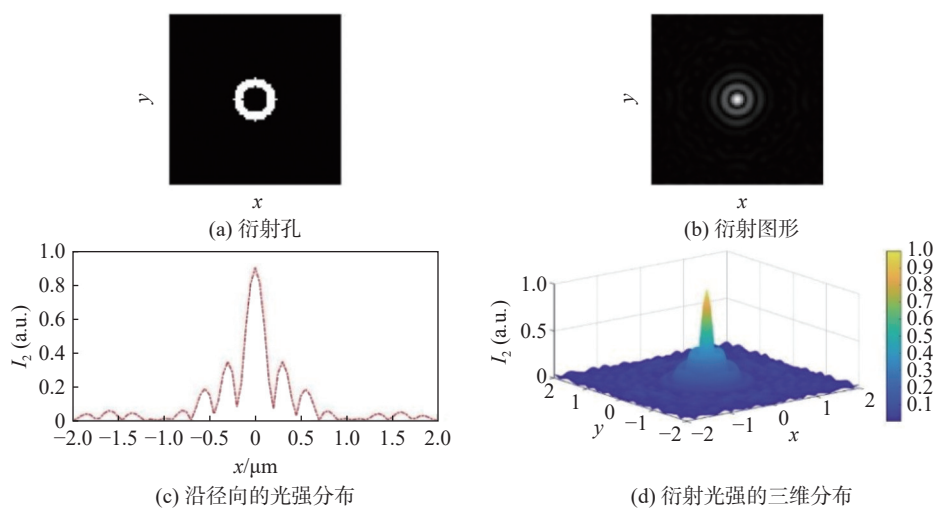
```

图3 衍射仿真绘图程序

为了验证以上程序的正确性, 本文仿真了环型宽度 $r_1=0.5\ \mu\text{m}$, $r_2=0.3\ \mu\text{m}$ 的衍射情况, 如图4所示。

图4(a)显示环型孔径并不是标准圆形, 这是由于网格划分的精度导致, 如果想要获取更加标准的环型模型, 可以通过提高网格划分密度实

现。从图4(b)可以看出, 衍射图形出现了清晰的明暗相间的圆环, 并且在图形中间出现了高亮度的亮斑, 这与光的直线传播不符, 说明光线通过圆环后出现了衍射行为。图4(c)较为直观地展现了衍射圆环在径向上的光强分布, 呈现一定的周期性, 并且峰值从中心向四周递减, 逐渐趋于零。当平面波通过圆环形的孔径时, 孔径的边缘会产生次级波源, 根据惠更斯原理, 这些次级波源会发出新的波前。这些波源发出的波在空间中传播并相互干涉, 由于圆环的形状会造成来自不同次级波源的波, 在到达观察点时有不同的相位差, 导致相干涉, 形成明暗相间的衍射图样。对于圆环缝隙这种具体的结构, 在观察屏上就会形成一系列同心的明暗环, 这些环的分布和强度与圆环的半径、波长以及观察距离等因素有关。图4(d)直观显示了衍射图像光强的三维分布, 由此可发现, 通过以上 `annular_diffraction.m` 程序可以很好地实现环型孔径的衍射仿真, 并对其进行更加细致的量化分析。接下来, 可以通过改变环型孔径大小, 观测不同孔径大小($\delta r=r_1-r_2$)下的衍射特征, 这是常规实验难以实现的, 是利用仿真技术进行光学实验教学的一大优势。

图4 环型宽度 $r_1=0.5\ \mu\text{m}$, $r_2=0.3\ \mu\text{m}$ 的衍射仿真图

3 不同环型孔径大小下的衍射仿真和分析

隔板孔径分别为 $\delta r=0.1, 0.2, 0.3, 0.4\ \mu\text{m}$ 下的衍射图形如图5所示。从图中可以看出, 随着衍射孔径的增大, 衍射圆环数量明显减少, 衍射现象逐渐变得不明显。

为更清晰地分析不同孔径下的衍射特征, 可

以绘制以上4种孔径下衍射图形中线上的光强分布。如图6所示, 孔径越小, 次峰的光强越大, 在图5的衍射图形中就表现为衍射圆环越多, 衍射行为越明显。但是, 中心点的光强则表现为: 孔径越小, 中心点的光强越小。这是由于透光量不同导致的, 孔径越大, 透光量越大, 中心点的光强越大。

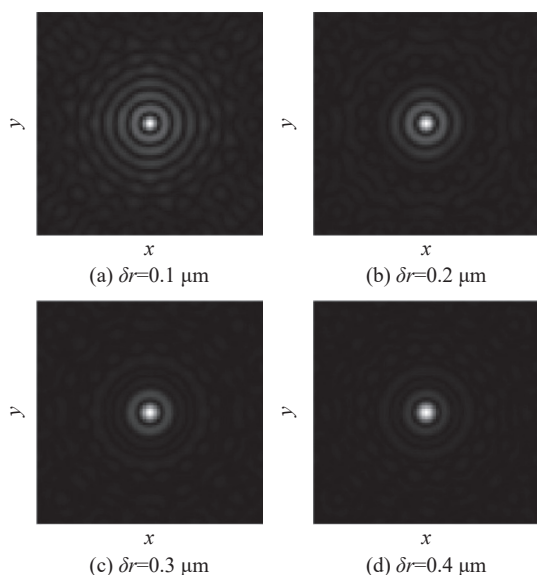


图 5 不同孔径下的衍射图形

4 不同孔径形状的衍射仿真及分析

采用 MATLAB 进行仿真实验最大的优势就是不受实验条件的限制, 可以通过快速的数字建模实现不同形状的波动光学衍射行为再现。接下来, 选取矩形和三角形孔径, 对其衍射情况进行仿真及结果分析。

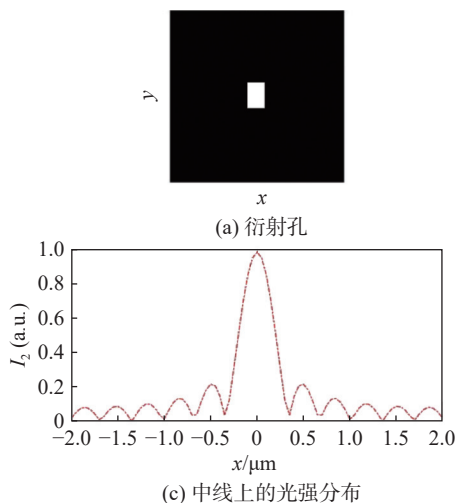


图 7 矩形孔径的衍射仿真图

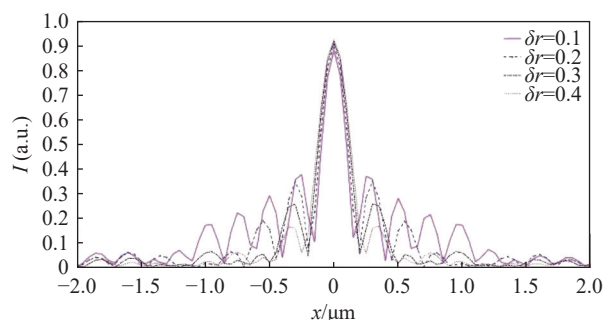
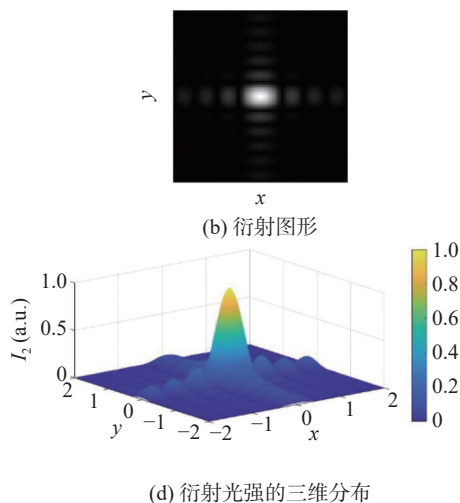


图 6 不同孔径下衍射图形中线上的光强分布图

4.1 矩形孔径的衍射仿真

将上述 annular_diffraction.m 程序中的环型建模语句 (if $r \leq 0.5$ && $r \geq 0.1$) 更换为 ($\text{abs}(i) \leq 0.3$ && $\text{abs}(j) \leq 0.2$), 并运行程序, 即可实现矩形孔径的衍射仿真实验, 如图 7 所示。由图 7(a) 和图 7(b) 可以清晰地发现, 矩形衍射亮斑的结合结构与衍射孔径具有一定的相似性, 但其长宽分布发生了 90° 的旋转, 这一特性适用于多种情形下的孔径衍射, 体现了衍射孔径的几何光学成像特征^[10]。根据衍射原理以及图 7(b) 和图 7(d) 模拟结果可知, 矩形结构 x 和 y 两方向的广场分布相似。其中 x 方向为窄宽度 ($0.1 \mu\text{m}$ 孔径), 其衍射效果更明显。因此图 7(c) 仅展示了对图 7(a) 中 x 方向, 宽度为 $0.1 \mu\text{m}$ 孔径的光强分布。



4.2 三角形孔径的衍射仿真

将上述 annular_diffraction.m 程序中的环型建模语句 (if $r \leq 0.5$ && $r \geq 0.1$) 更换为 (if $\text{abs}(i) \leq 0.4$ && $\text{abs}(j) \leq 0.4$ && $i = j$), 并运行程序, 即可实现三角形孔径的衍射仿真实验, 如图 8 所示。由图 8(a) 和图 8(b) 结合图 7(a) 和图 7(b) 可以发现

几条清晰的衍射条纹, 且衍射条纹走向与孔径的直边垂直, 这便是单反相机中普遍存在的“星芒”现象, 如图 9 所示。“星芒”现象是一种独特的光学效应, 它发生在光通过某些特定的物体或介质时, 光线呈现出辐射状的芒状光斑。“星芒”条纹的数量与衍射孔径的边数有关, 偶数边

的孔径会得到与边数相同条数的“星芒线”,如图 7(b)所示;奇数边的孔径会得到与边数两倍条

数的“星芒线”,如图 8(b)所示。且当孔径不同边平行时,“星芒”条纹会发生重合^[11]。

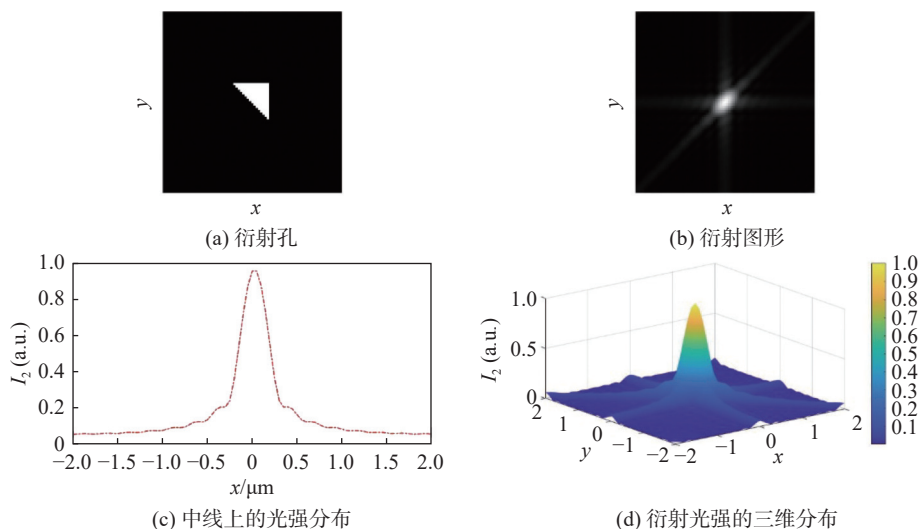


图 8 三角形孔径的衍射仿真图



图 9 单反相机拍摄时产生的“星芒”现象

5 结束语

光的衍射作为光学中的重要现象,在现代科学中扮演着至关重要的角色。通过对复杂结构的衍射现象进行仿真模拟和可视化,不仅可以更深入地理解光的波粒二象性,还能够在光学和物理学教学中为学生提供更加直观、生动的实验体验。借助 MATLAB 软件,我们得以探索和展示更多光的衍射现象,为光学研究和教学带来全新的可能性。这一研究不仅拓展了对光学现象的认识,也为光学教学的发展提供了新的思路和方法。

参考文献

[1] 钟可君,张海林. 基于 MATLAB GUI 设计的光学实验

仿真[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(10): 52-53.

[2] 徐少辉,李波,王连卫. 基于时域有限差分算法的光学 MATLAB 仿真[J]. 物理教学探讨, 2023, 41(8): 69-72.

[3] 胡世新,蔡鑫杭,高丽宇,等. 基于 MATLAB Guide 的大学物理光学实验平台[J]. 物理通报, 2023(6): 122-125.

[4] 邓冠龙,徐明铭,张淑宁. 基于 MATLAB 优化工具的最优化方法仿真教学[J]. 科教文汇, 2023(10): 109-112.

[5] 张敬雯,王文玲,黄安平. 利用傅里叶变换的可分割性计算夫琅禾费衍射图样[J]. 物理与工程, 2020, 30(6): 43-47.

[6] 吕波. 基于 MATLAB 的光学衍射仿真[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(4): 363-368.

[7] 孙运周,毕浩,胡中华,等. 基于 MATLAB 的物理光学衍射实验平台的仿真与设计[J]. 教育现代化, 2018, 5(10): 151-153.

[8] 刘惠萍,商祥年,程凯. 基于 MATLAB 的夫琅禾费衍射实验仿真研究[J]. 大学物理实验, 2022, 35(3): 99-101.

[9] 康森,熊显名,王鹏,等. 基于利特罗角的 8 细分光栅干涉仪读头设计[J]. 激光杂志, 2022, 43(5): 38-42.

[10] 龚德苏. 衍射图样与衍射孔径的相似性研究[J]. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 2002, 24(2): 26-28.

[11] 陈生奇,刘畅. 基于 DM6467 的视频图像增强系统研究[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(4): 67-74.

编辑 钟晓